

Анализ чувствительности двумерной гидродинамической модели к изменению коэффициента шероховатости

Сазонов А.А.^{1,2}, Крыленко И.Н.^{1,2}

¹МГУ имени М.В. Ломоносова

²Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Sazonov.lesha@gmail.com

Аннотация: С развитием компьютерных методов прогнозирования основных характеристик наводнений всё большее распространение получают методы гидродинамического моделирования. В данной работе использовалась двумерная гидродинамическая модель STREAM-2D. Основным параметр калибровки — коэффициент шероховатости, путем изменения которого становится возможным настроить модель и получить точное воспроизведение фактического уровня воды, скорости течения. Также, точное задание коэффициента шероховатости позволяет проимитировать наличие различных ледовых явлений, таких как затор или шуга.

В качестве объекта исследования был выбран участок Северной Двины: от узла слияния рек Сухона и Юг и до города Котлас. Данный район регулярно подвержен затоплению в связи с возникновением ледовых заторов. Прогнозирование основных характеристик затопления для данного района является важнейшей прикладной гидрологической задачей.

Цель данной работы — отдельно оценить влияние коэффициента шероховатости русла реки и её поймы на основные гидрологические характеристики затопления: среднюю глубину потока, среднюю скорость течения и площадь водной поверхности.

В качестве исходных данных задавались расходы рек Сухоны и Юга в пределах диапазона их изменений за период наблюдений, суммарный расход р. Малой Северной Двины составлял от 1000 до 11000 м³/с. Уровень на нижней границе автоматически рассчитывался моделью STREAM-2D на основании кривой зависимости $Q=f(H)$, построенной по суточным данным о расходах воды во время прохождения беззаторного половодья. В ходе выполненного исследования был проведен ряд имитационных расчетов: для каждого заданного расхода воды было проведено 9 различных вариантов расчетов при разных коэффициентах шероховатости. Коэффициенты шероховатости русла последовательно менялись с 0.02 до 0.032 с шагом в 0.04. Затем для русла устанавливался коэффициент шероховатости, равный 0.028 и последовательно менялся коэффициент шероховатости поймы: 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 и 0.1.

Анализ проведенных расчетов показал, что двумерная гидродинамическая модель наиболее чувствительна к изменению коэффициента шероховатости русла реки, при изменении коэффициента шероховатости поймы все рассматриваемые характеристики затопления изменяются незначительно. Наиболее чувствительная характеристика - это глубина потока, диапазон ее колебания при одном и том же расходе воды, но при разных коэффициентах шероховатости может достигать 0,53 м.

Ключевые слова: Моделирование, коэффициент шероховатости, речной поток.

С развитием компьютерных методов прогнозирования основных характеристик наводнений всё большее распространение получают методы гидродинамического моделирования. Для корректной работы любой модели, в данном случае двумерной гидродинамической модели STREAM-2D, необходимо производить калибровку параметров.

Основным параметром, влияющим на режим моделируемого речного потока, является коэффициент шероховатости, характеризующий состояние подстилающей поверхности русла и поймы. Для определения коэффициента шероховатости в различные годы были составлены таблицы такими гидравликами как М.Ф. Срибный, В.Т. Чоу, И.Ф. Карасев, Дж. Бредли, Н.М. Носов, И.И. Агроскин и другие.

В отечественной прикладной гидрологии наиболее распространены таблицы М.Ф. Срибного (Срибный, 1960), которые содержат значения коэффициента шероховатости для 17 различных типов вариантов подстилающей поверхности: 7 типов для пойм и 10 типов для речных русел, где коэффициент шероховатости пойм изменяется от 0.04 до 0.2, русел — от 0.025 до 0.133.

Подобная классификация была разработана американским гидравликом В.Т.Чоу (Чоу, 1969), все равнинные реки США он разделил по типу подстилающей поверхности на 10 типов. В ней диапазон коэффициентов шероховатости для русел составляет от 0.025 до 0.070, а для пойм от 0.025 до 0.160.

Другой американский гидравлик Дж. Бредли (Braydlay, 1960) предложил использовать классификацию типов поверхностей русел и пойм в зависимости от ширины водотока в период прохождения максимального расхода, то есть во время прохождения половодья или паводка. Данная классификация основана на идее различного влияния факторов, формирующих коэффициент шероховатости в различные периоды водности. Стоит отметить, что минимальные и максимальные значения коэффициентов шероховатости в классификации М.Ф.Срибного и Дж.Бредли достаточно близки, так минимальное значение коэффициента шероховатости русла у М.Ф.Срибного — 0.025, в то время как у Дж.Бредли это значение составляет 0.028, для поймы эти значения составляют 0.04 и 0.03 соответственно. Максимальные значения коэффициента шероховатости для русла у М.Ф. Срибного и у Дж. Бредли совпадают, для поймы значение коэффициента шероховатости у М.Ф. Срибного несколько выше, однако значения по-прежнему очень близки: 0.133 и 0.05.

Для горных рек СССР Н.М. Носовым была разработана в 1938 г. классификация, в которой основным критерием для разделения на типы является уклон водной поверхности и максимальные расходы воды. Для русла, сложенного мелкими фракциями наносов, илом, песком или мелким гравием значение коэффициента шероховатости составляет 0.022, а для крупных фракций, таких как валуны оно составляет 0.12. Данные коэффициенты шероховатости применимы для диапазона уклонов водной поверхности от 0.0005 до 0.08. и для диапазона максимальных расходов от 50 м³/с до 1000 м³/с (Железняков, Данилевич, 1966).

При расчетах, в том числе в гидродинамическом моделировании, стоит понимать, что коэффициент шероховатости - величина осредненная, фактическая шероховатость может заметно отличаться. Это связано с тем, что в действительности факторов, от которых зависит коэффициент шероховатости, намного больше, например, это могут быть различные виды донной растительности, изменение формы поперечного сечения, различные типы ледяного покрова и т.д.

В данной работе на примере двумерной гидродинамической модели ключевого участка в узле слияния рек Сухоны и Юга (от г. Великий Устюг до г. Котлас) (Agafonova et al., 2017), реализованной на основе программного комплекса STREAM_2D (авт. Беликов В.В.) (Belikov et al., 2000), были проведены численные эксперименты по оценке чувствительности основных моделируемых характеристик, таких как глубина потока (м), скорость течения (м/с), площадь водной поверхности (км²) к изменению коэффициентов шероховатости русел и пойм.

Все характеристики потока, полученные в ходе моделирования для каждой расчетной ячейки модели, осреднялись на основе программы, разработанной А.И.Алексюком (лаборатория гидрологии речных бассейнов ИВП РАН) «AverageInRegion».

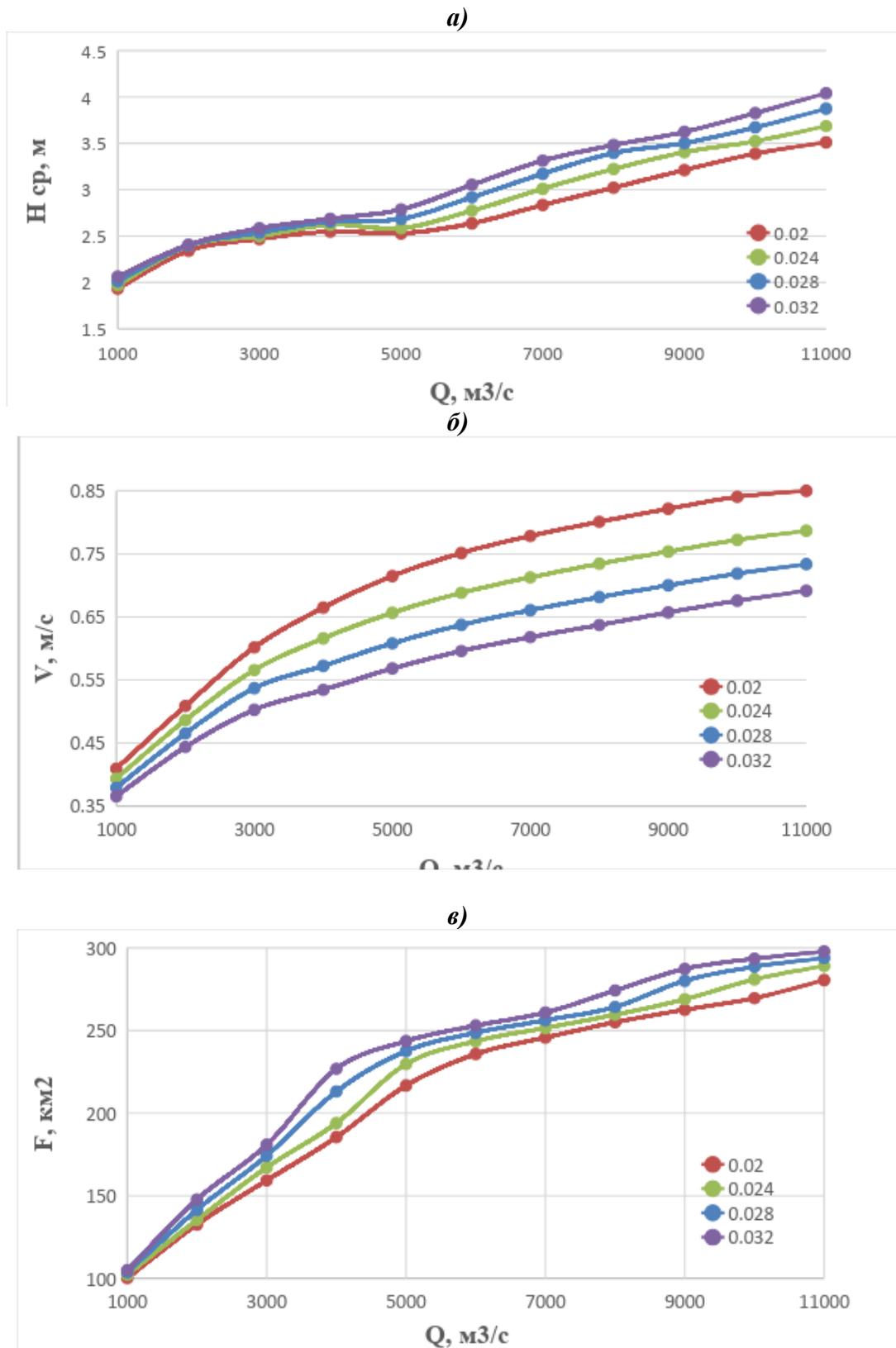


Рис. 1 Изменение основных гидрологических характеристик (а — средней глубины, м; б — средней скорости течения, в — площади водной поверхности) в зависимости от шероховатости русла

Все расчеты проводились в программном комплексе STREAM_2D, всего было выполнено 99 сценарных расчетов. В качестве исходных данных задавались расходы рек Сухоны и Юга в пределах диапазона их изменений за период наблюдений, суммарный расход р. Малой Северной Двины составлял от 1000 до 11000 м³/с. Уровень на нижней границе автоматически рассчитывался моделью STREAM-2D на основании кривой зависимости $Q = f(H)$, построенной по суточным данным о расходах воды во время прохождения беззаторного половодья.

Для каждого заданного расхода воды было проведено 9 различных вариантов расчетов при разных коэффициентах шероховатости: Коэффициенты шероховатости русла последовательно менялись с 0.02 до 0.032 с шагом в 0.04. Затем, для русла устанавливался коэффициент шероховатости, равный 0.028 и последовательно менялся коэффициент шероховатости поймы. Для проведения данного эксперимента были выбраны 5 вариантов коэффициентов шероховатости: 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 и 0.1. Данный набор коэффициентов был задан для рассмотрения всего диапазона изменения типов подстилающей поверхности от растительности на неосвоенной пойме до урбанизированных территорий. По итогам численных экспериментов для каждой гидрологической характеристики были построены графики зависимости от входного расхода воды при различных значениях коэффициента шероховатости.

На графике зависимости средней глубины от расхода воды при различной шероховатости русла (рис. 1а) видно, что до расхода воды 4000 м³/с различия несущественные и находятся в пределах погрешности определения, начиная с расхода 4000 м³/с коэффициент шероховатости русла начинает влиять на различие в глубине потока на величину более, чем 40-50 см. В среднем, при изменении коэффициента шероховатости русла на 0.04 глубина затопления меняется на 17 см. Максимальная глубина будет наблюдаться при расходе в 11000 м³/с и коэффициенте шероховатости 0.032 и будет составлять 4.04 м. Разница глубины при расходе в 11000 м³/с при коэффициенте шероховатости 0.02 и 0.032 составляет 53 см, что является достаточно большим различием при использовании двумерной гидродинамической модели при решении задач, связанных с затоплением территории.

Изменение скорости течения в зависимости от расхода воды показано на рис. 1б. При наибольшем расходе воды, 11000 м³/с, различие между скоростью течения при коэффициенте шероховатости 0.02 и 0.032 составляет 0,16 м/с, что является небольшим изменением скорости.

Форма кривой зависимости изменения площади затопления от расхода воды напрямую зависит от морфометрии рельефа (рис. 1в). Чем больше уклон склона и перепад высот между меженной высотной отметкой уровня реки и высотной отметкой бровки берега, тем меньше будет влияние коэффициента шероховатости русла. На графике это выражено в виде перегиба, соответствующего расходу воды в 4000 м³/с. На этом этапе происходит затопление поймы, по мере увеличения расхода воды прямо пропорционально растет площадь затопления, при 4000 м³/с начинает затоплять первую надпойменную террасу, в связи с чем увеличение площади затопления снижается.

Разница площадей затопления при максимальном расходе, 11000 м³/с при коэффициентах шероховатости русла 0.02 и 0.032 составляет 17 км², отсюда можно сделать вывод, что изменение коэффициента шероховатости русла незначительно влияет на площадь затопления.

При анализе результатов моделирования с изменением коэффициента шероховатости поймы можно отметить, что при максимальном задаваемом расходе воды разница средней глубины затопления составляет 35 см.

Средняя скорость течения меняется незначительно, наибольшее значение равно 0,71 м/с достигается при коэффициенте шероховатости 0,04, а минимальное значение равно 0,65 м/с при коэффициенте шероховатости 0.1. Таким образом, диапазон изменения скоростей составляет 0,06 м/с.

Площадь затопления также изменяется незначительно, в диапазоне от 276 км² до 286 км², для коэффициентов шероховатости от 0,1 до 0,04 соответственно.

В качестве вывода можно отметить, что модель наиболее чувствительна к изменению коэффициента шероховатости русла реки, особенно сильно меняется глубина потока. Это обстоятельство необходимо учитывать при проведении моделирования заторных ситуаций, имитации наличия других ледовых явлений, требующих изменения коэффициента шероховатости.

Калибровка и верификация модели проведены при поддержке проекта РНФ 17-11-01254, численные эксперименты при поддержке проектов РФФИ № 17-05-01230-а, 18-35-00498-мол-а.

Список литературы

Железняков Г.В., Данилевич Б.Б. Точность гидрологических измерений и расчетов. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 240 с.

Срибный М. Ф. Формула средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по сопротивлению движения. В Сб.: Исследования и комплексное использование водных ресурсов. М., АН СССР, 1960: 204-220.

Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.

Agafonova S.A., Frolova N.L., Krylenko I.N., Sazonov A.A., Golovlyov P.P. Dangerous ice phenomena on the lowland rivers of European Russia // *Natural Hazards*. 2017. Vol. 88: 171–188.

Belikov V.V., Semenov A.Yu. Non-Sibsonian interpolation on arbitrary system of points in Euclidean space and adaptive isolines generation // *Appl Numer Math*. 2000. 32: 371–387.

Braydlay I. N. Hydraulics bridge waterways // *Hydraul. Res.*, sez № 1. Div. Hydraul. Res. of Public. Roads. Wash., D. C. 1960: 1-53.

Sensitivity analysis of two-dimensional hydrodynamic model to changes of the roughness coefficient

Sazonov A.A.^{1,2}, Krylenko I.N.^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences*
Sazonov.lesha@gmail.com

Abstract: In this investigation two-dimensional hydrodynamic model «STREAM-2D» was used for forecasting of the main characteristics of floods. The main parameter of calibration is the roughness coefficient, by changing which it becomes possible to adjust the model and get an accurate reproduction of the actual water level and flow velocity. Also, the exact setting of the roughness coefficient allows to simulate the presence of various ice phenomena, such as ice jam or sludge. The site of the Northern Dvina river was chosen as the object of research: from the confluence of the Sukhona and South rivers to Kotlas city. This area regularly undergoes flooding due to the occurrence of ice jams. Forecasting of the main characteristics of flooding for this area is the most important applied hydrological task. The purpose of this work is to assess separately the influence of riverbed roughness coefficient and its floodplain on the main hydrological characteristics of flooding: average depth of flow, average flow velocity and water surface area. Discharge data of the rivers Sukhona and Yug within the range of their changes during the observation period were used, the total flow discharge ranged from 1000 to 11000 m³/s. The level at the lower boundary was automatically calculated by the STREAM-2D model on the basis of the dependence curve $Q=f(H)$, based on the daily data during flood without ice jam.

In this research, calculations were carried out for each given water flow velocity, 9 different variants of calculations were carried out at different roughness coefficients: the roughness coefficients of the channel were sequentially changed from 0.02 to 0.032 with a step of 0.04. Then, for the channel the roughness coefficient equal to 0.028 was established and the roughness coefficient of floodplain was sequentially changed: 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 and 0.1. The analysis of the calculations showed that the two-dimensional hydrodynamic model is most sensitive to changes in the roughness of the river bed. When the roughness of the floodplain changes, all the characteristics of flooding are changed slightly. The most sensitive characteristic is the depth of the flow.

Keywords: Modeling, coefficient of roughness, river flow